



**Universidad**  
Zaragoza



Escuela de  
Ingeniería y Arquitectura  
**Universidad** Zaragoza

# **Proyecto Fin de Carrera**

Ingeniería Industrial

## **Optimización topológica de los largueros del bastidor de un semirremolque de tipo bañera**

Autor:

**Miguel Mateo Meléndez**

Directores:

**Luis Castejón Herrer**

**David Valladares Hernando**

Escuela de Ingeniería y Arquitectura

Departamento de Ingeniería Mecánica

**Convocatoria de Febrero-Marzo**

**Curso académico 2012/2013**

# **Optimización topológica de los largueros del bastidor de un semirremolque de tipo bañera.**

## **RESUMEN**

Este proyecto trata sobre la optimización topológica de los largueros de un bastidor de un semirremolque del tipo bañera.

Esta optimización consistirá en un estudio sobre que espesor es el idóneo para cada una de las partes de los largueros del bastidor, las cuales son: ala inferior, ala superior y alma.

Para conseguir una mejor calidad y exactitud en los resultados se dividirán las partes de los largueros en tramos de 500 mm, y se darán diferentes valores de espesor a cada tramo según los resultados del estudio de optimización.

El objetivo de este proyecto es, como ya se ha comentado, conseguir un diseño óptimo de los largueros en cuanto al espesor de cada uno de los tramos se refiere, atendiendo a una serie de variables de rigidez y resistencia tales como tensiones, desplazamientos, coeficientes de seguridad, etc. Con este análisis se pretende minimizar la masa del bastidor manteniendo (disminuyendo ó aumentando ligeramente en algunos casos) todas estas variables dentro de unos límites previamente establecidos.

Para realizar este estudio se utilizarán algunas herramientas informáticas tanto de elementos finitos como de optimización.

## ÍNDICE

**Introducción.....págs 1-4**

**Desglose del proyecto (pag 5):**

**Marco previo del proyecto.....págs 6-8**

**Alteraciones del modelo.....págs 9-11**

**Diseño de experimentos para la optimización.....págs 12-14**

**Primeros resultados y post-procesamiento de los mismos.....págs 15-16**

**Resultados y análisis.....págs 17-23**

**Cambio de materiales.....págs 24-28**

**Ahorro en los costes.....págs 29-30**

**Conclusiones..... pág 31**

**Bibliografía..... pág 32**

**Anexos:**

**Anexo 1.....págs 33-37**

**Anexo 2.....págs 38-123**

**Anexo 3.....págs 124-130**

**Anexo 4.....págs 131-136**

**Anexo 5.....págs 137-139**

## INTRODUCCIÓN

Para situar al lector en el contexto de este proyecto lo primero que se debe hacer al hablar de un término como la optimización topológica es dar una definición concreta de la misma, ya que puede que sea un aspecto desconocido en el ámbito del diseño de estructuras.

La optimización topológica es uno de los métodos más utilizados de cara a mejorar las características de una estructura. Generalmente este método se suele aplicar a las geometrías continuas como estructuras laminares tipo placa y solidas. Lo cual engloba a este proyecto en concreto, ya que el modelo del bastidor de este semirremolque está diseñado, en el programa de elementos finitos, con elementos del tipo placa.

El objetivo de este tipo de optimización es el de encontrar un mejor uso de los materiales de una estructura según una serie de criterios objetivos, que en este caso son criterios de rigidez y resistencia, y siempre dentro de unos máximos y mínimos según unas limitaciones previamente establecidas.

Normalmente, en este tipo de optimización es la función de distribución del material la que sirve como parámetro de optimización, aunque existe otro tipo de optimización topológica más utilizado que consiste en la creación de agujeros y cavidades en las estructuras estudiadas siguiendo una serie de algoritmos preestablecidos que mejoran la calidad de la estructura según los valores de estudio.

En este proyecto, se utilizará la optimización topológica para conseguir optimizar una de las partes del bastidor de un semirremolque, los largueros (la zona coloreada en verde en la *Figura 1*).

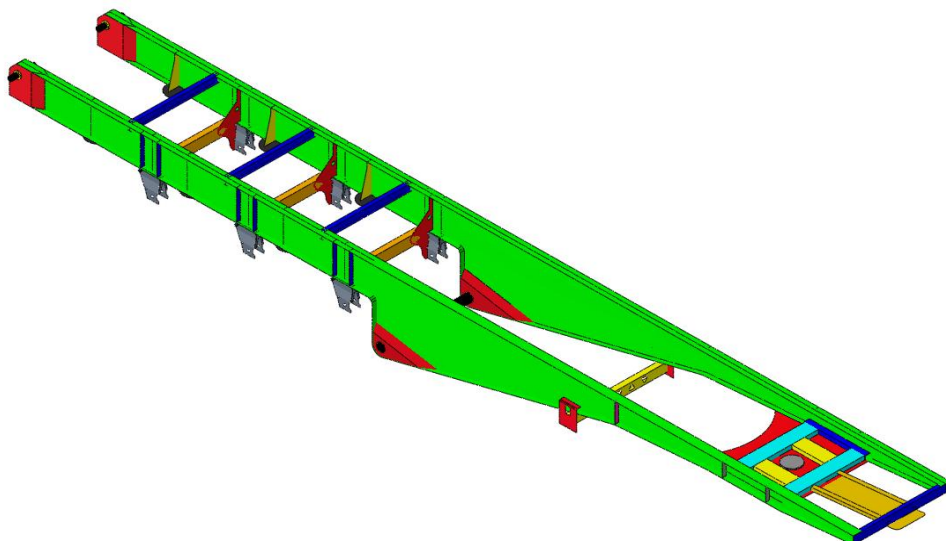


Figura 1. Bastidor semirremolque

Dicho elemento del bastidor está formado a su vez por otros tres:

- Ala superior
- Ala inferior
- Alma

El modelo del bastidor que se observa en la figura es un modelo ya existente de un bastidor de semirremolque de tipo bañera que ha sido diseñado por el departamento de ingeniería mecánica de la universidad de Zaragoza para la empresa Leciñena, también situada en la provincia de Zaragoza.

Este modelo ha sido calculado para varios casos en cuanto a sollicitación de esfuerzos se refiere, tales como distintas sollicitaciones de carga, distintos giros de la estructura, diferentes puntos de apoyo, etc. Y tras un consenso entre el autor y los directores de este proyecto se ha decidido que el estudio de optimización sólo se realizará de uno de estos casos, concretamente aquel en el que se intuye un mayor esfuerzo por parte del bastidor, es decir, se calculará para el caso que es más perjudicial para la estructura.

Más tarde, en otras secciones, se explicarán con mayor exactitud las características específicas de este caso.

El modelo previo que va utilizarse en este proyecto ha sido varias veces optimizado (tantas veces como 7) con diferentes cambios en varios parámetros, algunos de estos cambios respecto al diseño original son los siguientes:

- Cambios de espesor en largueros (tanto en las alas como en el alma).
- Cambios de material en largueros, puentes transversales y longitudinales y chapas.
- Creación de refuerzos en diferentes zonas, ya sea por medio de nervios o chapas.
- División en tramos de los largueros dándoles a cada uno un espesor más ajustado.
- ...

Tras todos estos cambios se ha querido diseñar un modelo óptimo en cuanto a valores de masa se refiere, siempre conservando los mismos valores de rigidez y resistencia para tenerlo como referencia a la hora de comparar con futuras modificaciones del diseño.

El objetivo de este estudio será el de conseguir unos valores óptimos de espesor para cada uno de los tramos en los que se dividirá cada una de las partes de los largueros, que den unos valores mínimos para la masa total del bastidor siempre y cuando se mantengan los valores relacionados con los esfuerzos, desplazamientos y coeficientes de seguridad.

Tras llevar a cabo la división de los largueros en estos tramos de 500 mm de longitud, los tres elementos quedarán divididos cada uno en 23 partes, ya que la medida longitudinal de los largueros es de 11,5 m (para ser exactos 11.495 mm). Por tanto se abordará un estudio topológico de 69 variables de espesor diferentes, si se tiene en cuenta que cada variable corresponde a un tramo del larguero izquierdo y a otro del derecho debido a la simetría de la estructura.

Para conseguir este objetivo lo primero que se deberá hacer es aprender a utilizar las herramientas informáticas de diseño necesarias, que en este caso son tres:

- **Patran** – Herramienta utilizada para la creación del diseño original del bastidor del semirremolque, y que se usará en este proyecto para dividir los tres elementos de los largueros del diseño previamente optimizado en las 23 partes antes mencionadas. Es un programa de elementos finitos, y por tanto se trabajará con estructuras malladas, lo cual dificultará la división, ya que el modelo a dividir ya ha sido mallado previamente.



- **Abaqus** – Programa de análisis de elementos finitos donde se podrán ver los resultados de las simulaciones que se han ejecutado con Patran. En este programa se podrán ver los valores de variables como los esfuerzos, desplazamientos, coeficientes de pandeo que se tendrán en cuenta a la hora de elegir el diseño óptimo.



- **NOESIS Optimus** – Con este programa se llevará a cabo la optimización de la estructura mediante el uso de diferentes métodos matemáticos que más tarde se comentarán. Este programa trabaja con archivos tanto de Patran como de Abaqus y por tanto es necesario haber trabajado con ellos previamente para poder comenzar el estudio. Con este programa se conseguirán extraer los mejores valores para cada uno de los tramos de los largueros, consiguiendo así minimizar los valores seleccionados en los ficheros de Abaqus que se introducen en este programa.



A lo largo de esta memoria van a poderse observar con detalle los pasos dados para conseguir llegar al diseño óptimo de este bastidor. Se expondrán las tareas realizadas con cada uno de los programas de diseño que se van a utilizar y como deben vincularse unas a otras para conseguir el objetivo final.

En otros apartados también podrán verse los resultados de cada uno de los experimentos de optimización que se lleven a cabo para poderse comparar unos con otros, además de para poder sacar conclusiones acerca de, por ejemplo, que parámetros de todos los estudiados influyen más en la búsqueda del diseño óptimo de los largueros.

## DESGLOSE DEL PROYECTO

En este apartado se van a introducir todas las secciones relacionadas con el análisis de la optimización del bastidor de semirremolque.

Aquí se expondrán todos los cálculos, resultados, métodos y demás que hayan sido empleados durante la elaboración de este proyecto, incluyendo además los trabajos previos sobre los que se ha sustentado el mismo.

Las secciones que van a analizarse son las siguientes:

- **Marco previo del proyecto:** modelos anteriores, cálculos, modificaciones realizadas anteriormente, etc.
- **Alteraciones del modelo:** los cambios realizados sobre la anterior optimización para llevar a cabo este análisis.
- **Diseño de experimentos para la optimización:** Se expondrán las características preestablecidas para el proceso de optimización, así como los criterios fijados para dar o no viabilidad a una posible solución.
- **Primeros resultados y post-procesamiento de los mismos:** Tras un primer cálculo de experimentos se pasará a un análisis más fino de los resultados para poder seguir con el proceso de reducción de la masa de la estructura por un camino diferente.
- **Resultados y análisis:** En este apartado se mostrarán como han ido evolucionando los resultados a lo largo del proceso, si los distintos experimentos van cumpliendo o no los requisitos y los valores finales tanto de espesores de los elementos como de los resultados.
- **Cambio de materiales:** Tras conseguir la máxima optimización de la masa del bastidor se llevará a cabo un pequeño análisis acerca de los materiales de los distintos tramos de los largueros y de si se puede o no reducir la resistencia del acero que los forma para conseguir un ahorro en los costes.
- **Ahorro en los costes:** Se mostrarán resultados acerca de como se ha conseguido disminuir los costes tanto de fabricación como de uso gracias a la optimización de la masa de la estructura.



## MARCO PREVIO DEL PROYECTO

Este proyecto está basado en un modelo previo de bastidor de semirremolque desarrollado por el departamento de ingeniería mecánica de la universidad de Zaragoza para la empresa Leciñena.

El modelo de semirremolque diseñado es del tipo bañera. Este tipo de semirremolques son utilizados para transportar grandes pesos en su caja, siendo su uso más común el de transportar por carretera materiales de desmonte o para rellenos durante las explanaciones de las obras de carretera, y transportar aglomerado asfáltico durante la ejecución del firme. Además posee un sistema basculante para descargar la carga de una forma más llevadera. Se puede ver un semirremolque de tipo bañera en la imagen de debajo (*Figura 2*).



Figura 2. Ejemplo de Semirremolque tipo bañera

Para poder realizar las simulaciones adecuadas y poder obtener resultados acerca de los esfuerzos, deformaciones, desplazamientos y demás que la estructura pudiese sufrir en un caso real, se utilizó la herramienta informática PATRAN para diseñar una estructura de elementos finitos con la que poder trabajar.

Este modelo en particular está formado por 84575 elementos y 85078 nodos que forman todos los elementos que posee este bastidor, no sólo los largueros a los que este proyecto se refiere, sino también otros elementos como refuerzos, chapas, ejes, escudos...

El modelo empleado en este proyecto puede observarse en la siguiente figura (*Figura 3*) en la que se observa el mallado de elementos finitos que se ha diseñado para la estructura.

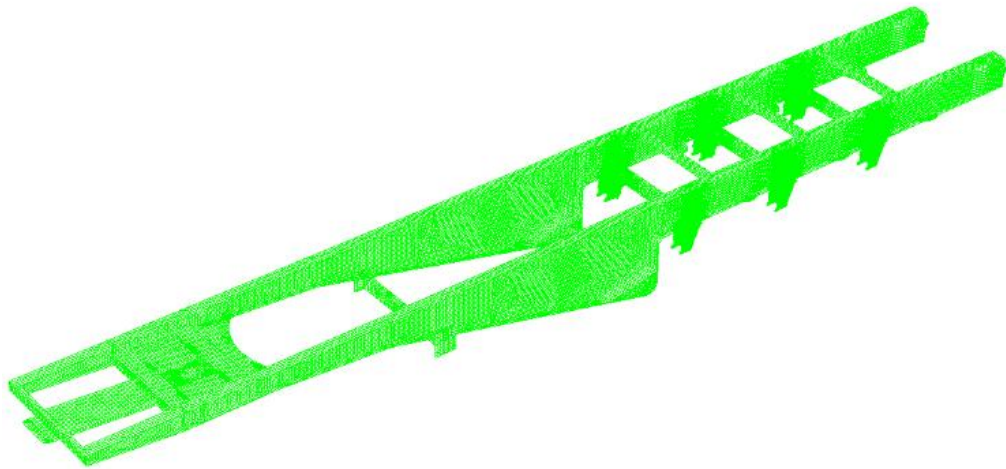


Figura 3. Modelo de elementos finitos

Como puede verse en la figura de abajo (*Figura 4*), el bastidor está compuesto por varios elementos además de los largueros (coloreados en verde y que son el objeto de estudio de este proyecto en particular) que son tremendamente importantes para que la estructura soporte los esfuerzos de forma correcta y que han sido añadidos en las sucesivas optimizaciones por las que ha pasado este modelo (tantas como 7, la de este proyecto es la octava). Algunas de estos elementos soportan tensiones críticas y deben tenerse muy en cuenta a la hora del análisis, pero esto se observará más adelante en los siguientes apartados de la memoria. Si se desea puede verse un breve resumen de todas las modificaciones a las que ha sido sometido este diseño antes de este proyecto en el **Anexo 1**.

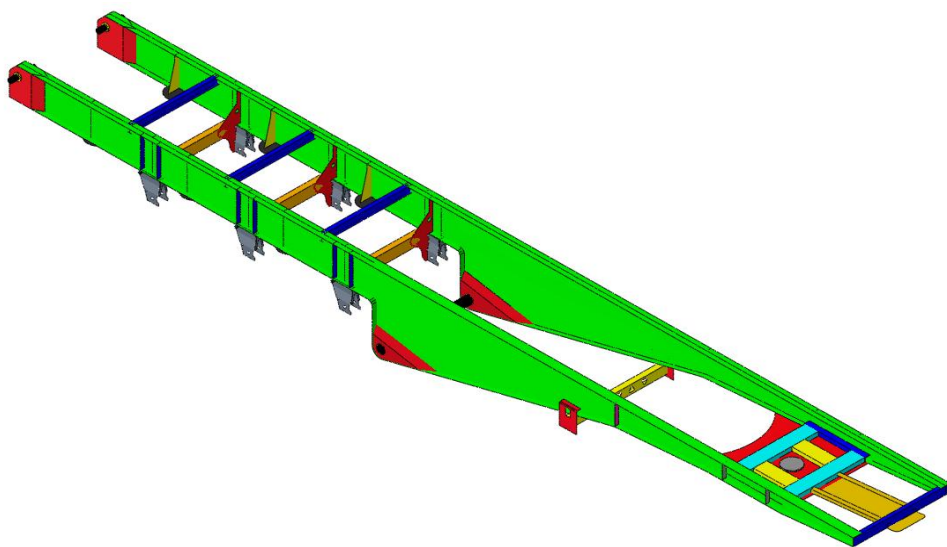


Figura 4. Bastidor semirremolque

Este modelo fue estudiado para diferentes casos de carga para observar como respondía a los esfuerzos y también para poder averiguar cuál era la situación de máxima sollicitación en cuánto a esfuerzos se refiere.

Las situaciones de carga a las que fue sometido en la simulación fueron dos:

- **Impulso inicial** – Se refiere al momento en que los actuadores de la estructura comienzan a bascular una carga de 31200 kg (la consensuada para las simulaciones) situada en la caja bañera. La carga establecida es consecuencia de los 24000 kg que se suponen de carga mayorada un 1.3 por los efectos dinámicos. Se supone que la carga se distribuye por una superficie plana a lo largo de toda la cara superior del bastidor, lo que sería el suelo de la caja bañera.

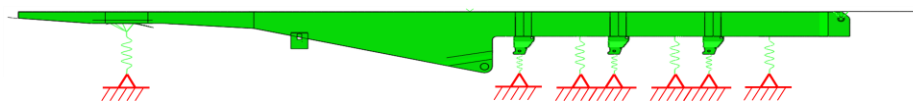


Figura 5. Caso impulso inicial

- **Giro 45°** – se refiere a la situación en la que la caja bañera al bascularse, cargada con el mismo peso que en el caso anterior (24000 kg) pero esta vez sin simular los efectos dinámicos, forma un ángulo de 45° con la horizontal del bastidor.

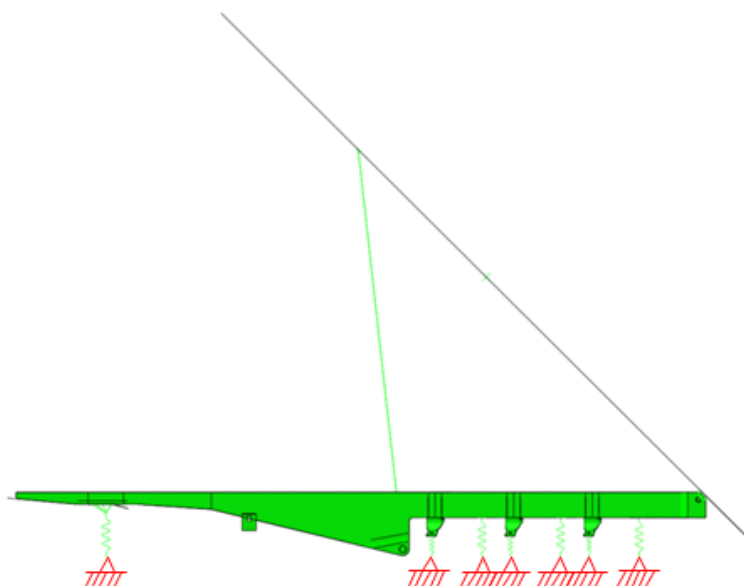


Figura 6. Caso giro 45°

Tras observar los resultados que daba cada uno de los casos se decidió por parte del autor y los codirectores que la optimización que constituye este proyecto se realice sólo sobre el caso del impulso inicial, ya que es la situación en la que más sufre la estructura y las tensiones en las zonas de máxima exigencia puede alcanzar valores del doble de las del caso de giro a 45°.

Seguidamente se expondrán las modificaciones realizadas en el modelo que se utiliza como base para este proyecto y el por qué de las mismas.

## ALTERACIONES DEL MODELO

El modelo de bastidor de semirremolque que se utiliza en este proyecto y que ya ha sido explicado en el apartado anterior de esta memoria sufre una serie de modificaciones preestablecidas por los codirectores de este proyecto antes de comenzar el análisis sobre la posibilidad de reducir la masa de los largueros que forman la estructura.

Concretamente se llevará a cabo una división del mallado de elementos finitos de los largueros del modelo en tramos de unos 500 mm de longitud cada uno y separando las tres partes que forman los largueros, es decir, el alma y las alas.

La longitud del modelo es de exactamente 11.495 mm, por lo que los largueros se dividirán en 23 tramos de aproximadamente 500 mm cada uno (se dice aproximadamente porque algunos de los elementos del mallado no son rectangulares sino romboidales o triangulares, y por tanto no puede hacerse una división perfecta de algunos de los tramos). La división del modelo puede verse en la siguiente imagen (*Figura 7*).

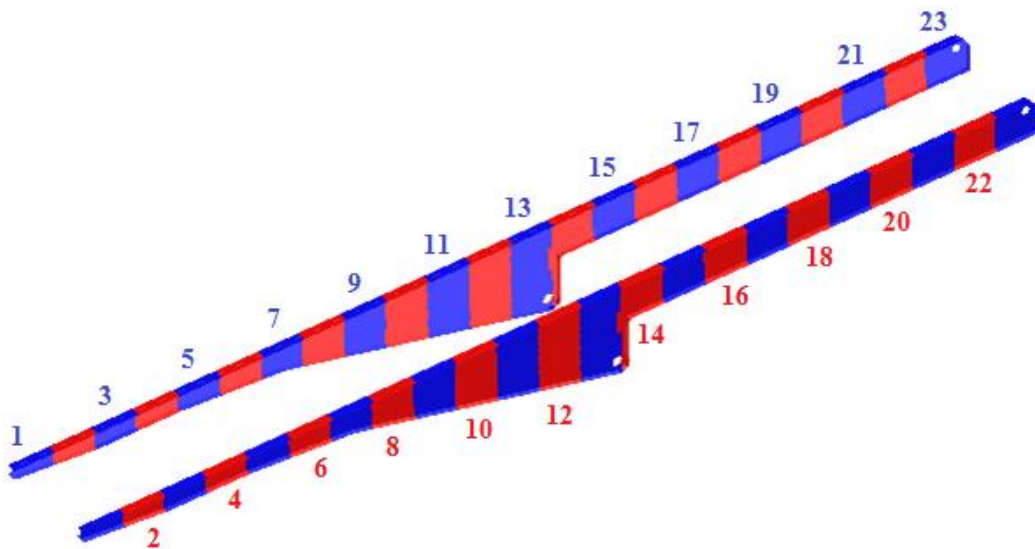


Figura 7. División en tramos de los largueros

Como ya se ha comentado la división es separada en cuanto a alma y alas se refiere, la imagen de arriba sólo muestra las marcas de división de cada uno de los tramos. Cada tramo de alma, ala superior y ala inferior es independiente y podrá tener su propio espesor.

En las siguientes imágenes se podrán ver los valores de espesor y materiales de cada elemento los largueros y las longitudes de cada tramo en las que se dividía en un principio dichos largueros.

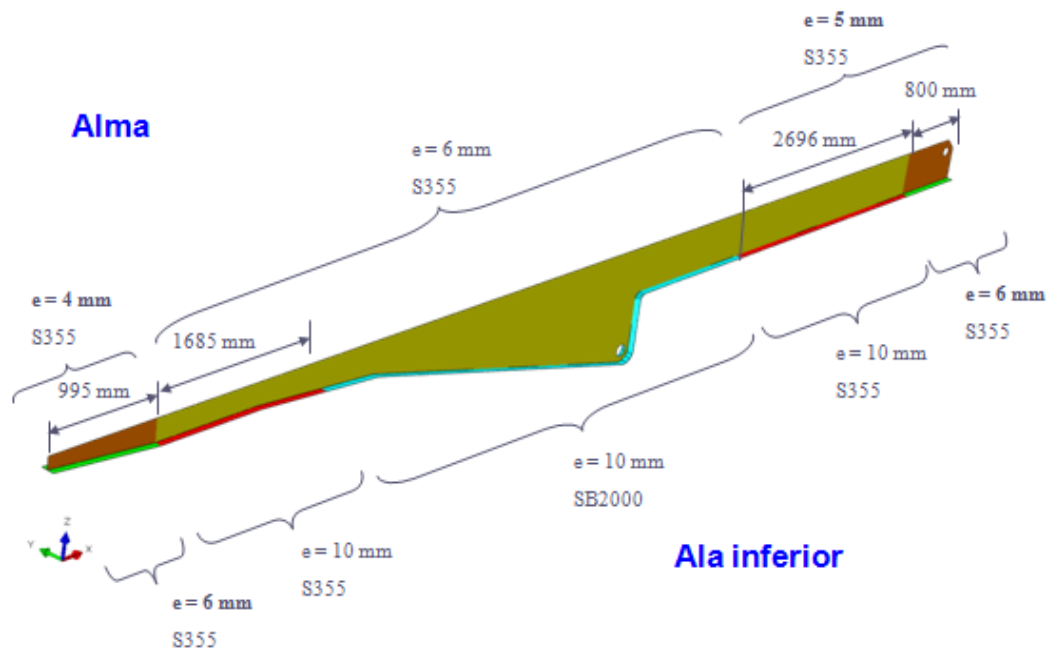


Figura 8. Espesores originales Ama y Ala inferior largueros

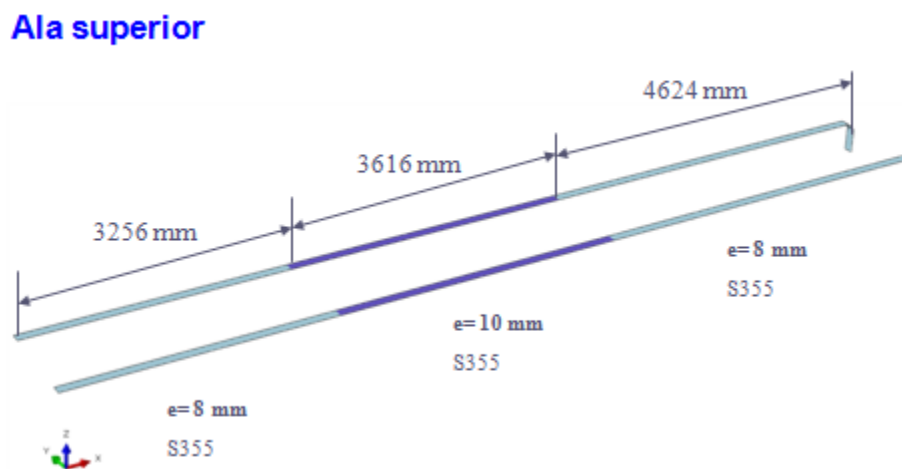


Figura 9. Espesores originales Ala Superior largueros

Como se puede ver en las imágenes de arriba los espesores y los materiales de cada división de los largueros (alma y alas) no concuerdan exactamente con múltiplos de 500 mm, es decir, que hay tramos que según el modelo original deberían estar formados por dos placas de espesores y materiales distintos.

Con estos casos concretos se hará una pequeña aproximación en la que si debido a la división de los 23 tramos uno de ellos debiera estar compuesto por dos materiales o espesores distintos, prevalecerán las características de la zona de mayor longitud que compondría ese tramo, es decir, si al llevar a cabo la división, uno de los tramos de 500 mm estuviese compuesto por una longitud de 400 mm de una placa de espesor 5mm y otra longitud de 100 mm de una placa de espesor 4mm, el tramo de 500 mm tendría 5mm de espesor en toda su longitud.

Con esto, los valores de espesor y materiales de cada uno de los tramos en los que se dividirá el modelo pueden verse en la siguiente tabla.

	MATERIAL	ESPESOR (mm)		MATERIAL	ESPESOR (mm)		MATERIAL	ESPESOR (mm)
ALMA 1	S355	4	ALA-SUP 1	S355	8	ALA-INF 1	S355	6
ALMA 2	S355	4	ALA-SUP 2	S355	8	ALA-INF 2	S355	6
ALMA 3	S355	6	ALA-SUP 3	S355	8	ALA-INF 3	S355	10
ALMA 4	S355	6	ALA-SUP 4	S355	8	ALA-INF 4	S355	10
ALMA 5	S355	6	ALA-SUP 5	S355	8	ALA-INF 5	S355	10
ALMA 6	S355	6	ALA-SUP 6	S355	8	ALA-INF 6	SB2000	10
ALMA 7	S355	6	ALA-SUP 7	S355	8	ALA-INF 7	SB2000	10
ALMA 8	S355	6	ALA-SUP 8	S355	10	ALA-INF 8	SB2000	10
ALMA 9	S355	6	ALA-SUP 9	S355	10	ALA-INF 9	SB2000	10
ALMA 10	S355	6	ALA-SUP 10	S355	10	ALA-INF 10	SB2000	10
ALMA 11	S355	6	ALA-SUP 11	S355	10	ALA-INF 11	SB2000	10
ALMA 12	S355	6	ALA-SUP 12	S355	10	ALA-INF 12	SB2000	10
ALMA 13	S355	6	ALA-SUP 13	S355	10	ALA-INF 13	SB2000	10
ALMA 14	S355	6	ALA-SUP 14	S355	10	ALA-INF 14	SB2000	10
ALMA 15	S355	6	ALA-SUP 15	S355	8	ALA-INF 15	SB2000	10
ALMA 16	S355	6	ALA-SUP 16	S355	8	ALA-INF 16	SB2000	10
ALMA 17	S355	5	ALA-SUP 17	S355	8	ALA-INF 17	S355	10
ALMA 18	S355	5	ALA-SUP 18	S355	8	ALA-INF 18	S355	10
ALMA 19	S355	5	ALA-SUP 19	S355	8	ALA-INF 19	S355	10
ALMA 20	S355	5	ALA-SUP 20	S355	8	ALA-INF 20	S355	10
ALMA 21	S355	5	ALA-SUP 21	S355	8	ALA-INF 21	S355	10
ALMA 22	S355	5	ALA-SUP 22	S355	8	ALA-INF 22	S355	8
ALMA 23	S355	5	ALA-SUP 23	S355	8	ALA-INF 23	S355	6

Tabla 1. Valores de espesor iniciales

El objetivo que se pretende conseguir con la división del modelo en 23 tramos distintos para cada elemento de los largueros es que la distribución del espesor a lo largo de todas las placas que formarán la estructura sea lo más afinada posible.

Cuanto mayor sea el número de tramos en el que se dividan los largueros, mayor será la precisión con la que se podrán manipular variables como:

- La tensión en las zonas más críticas.
- El peso total de la estructura.
- El ahorro en los costes de fabricación.
- ...

## DISEÑO DE EXPERIMENTOS PARA LA OPTIMIZACIÓN

Una vez redistribuido los elementos del mallado del modelo original y dado los valores preestablecidos de espesor y material a cada uno de los 23 nuevos tramos en los que se ha dividido cada elemento de los largueros de la estructura se va a proceder al primer diseño de experimentos en torno a estos primeros valores establecidos.

La optimización de este diseño, como ya se ha comentado anteriormente, se centra en la disminución de la masa de la estructura cambiando sólo parámetros referentes a los largueros, en este caso, sólo se modificarán los espesores de los diferentes tramos que se han creado.

Con el programa OPTIMUS se puede diseñar una serie de experimentos alrededor de una situación inicial (los valores de espesor del apartado anterior) en los que se van modificando secuencialmente los valores de las 69 variables que se han creado para este proyecto (23 valores de espesor por cada división de cada elemento de los largueros) en torno a unos límites que se pueden estipular previamente. Además también pueden introducirse valores máximos y mínimos de tensión de determinadas zonas de la estructura con los que el programa, según el experimento previo, decidirá qué valores de espesor deben ser aumentados cuales disminuidos y cuales mantenidos. De esta forma se cercará cada vez más una solución óptima.

Se puede ver el Workflow (flujo de trabajo) empleado en el programa OPTIMUS en la figura 10. Donde se incluyen los parámetros modificables (azul) y los resultados a tener en cuenta para ver la viabilidad de la optimización (rojo).

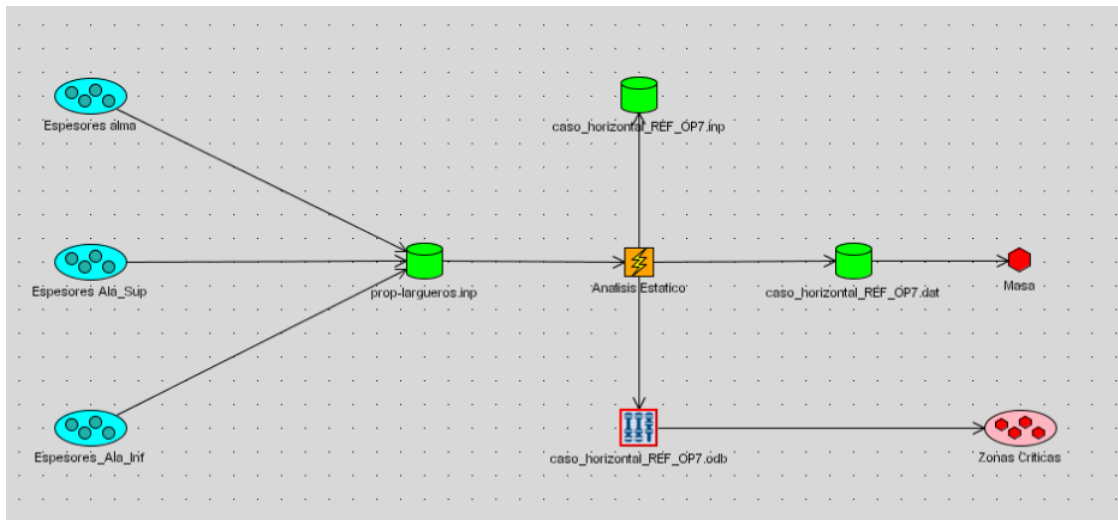


Figura 10. Workflow OPTIMUS



Los criterios que se tendrán en cuenta para que el experimento sea válido serán los siguientes:

1. **Criterios sobre los límites del espesor:**

- $\pm 1\text{mm}$  para los cambios de espesor en los tramos del **alma**.
- $\pm 2\text{mm}$  para los cambios de espesor en los tramos de las **alas**.

2. **Criterios de resistencia:** **El criterio más importante.** Los valores de la tensión de Von Mises en las zonas más críticas que se mostrarán a continuación no pueden superar unos límites establecidos según los coeficientes de seguridad originales en cada zona.

- Las zonas con **CS = 1.0** **NO** podrán **aumentar** su tensión.
- Las zonas con  $1.1 < \text{CS} < 1.5$  podrán sufrir **ligeras variaciones**.
- Las zonas con  $1.5 < \text{CS} < 1.7$  podrán sufrir **variaciones moderadas**, pero **nunca** rebajando su **CS a menos de 1.5**.

3. **Criterios de rigidez:** Los desplazamientos máximos no deberán aumentar de forma considerable respecto a los valores de la anterior optimización.

Todos estos criterios se basan en los valores de espesor, tensión y desplazamientos del modelo que se toma como referencia para este proyecto, la optimización 7. En las siguientes tablas se podrán ver estos valores de referencia para los criterios de tensión y coeficiente de seguridad (*Tabla 2*) y para el desplazamiento en las tres direcciones (*Tabla 3*).

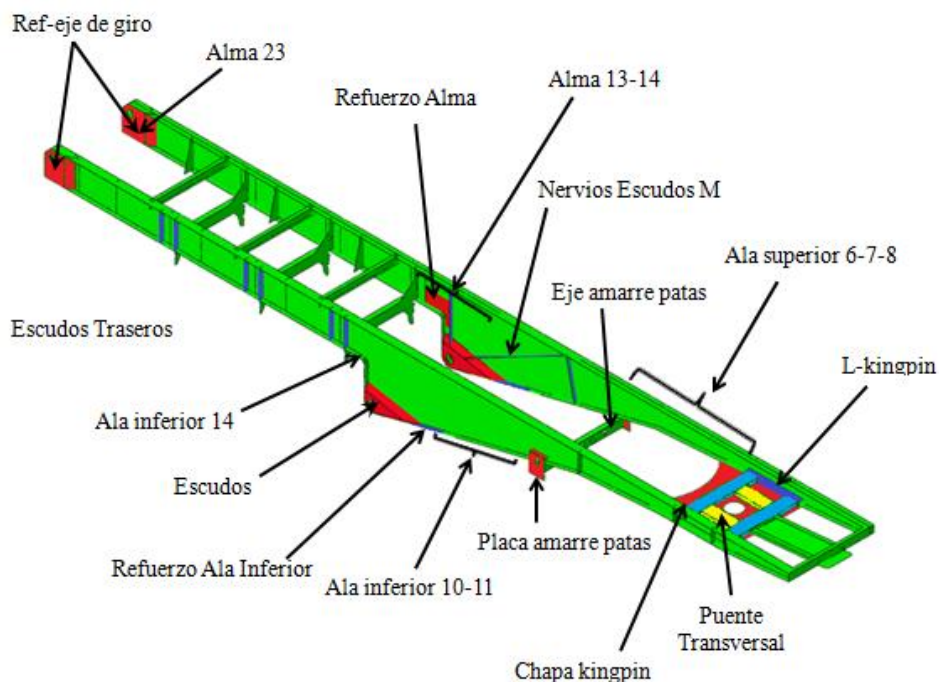


Figura 11. Zonas críticas



Para comprender la nomenclatura que aparece en la *Tabla 2* de las zonas, se muestra en la siguiente imagen donde se sitúa cada una de ellas (excepto las referentes a los largueros ya que por nomenclatura numérica es más sencillo saber su posición y así se observa mejor el resto de zonas en la figura).

		MATERIAL	$\sigma$ (MPa)	OPT 7	CS OPT 7
VM (MPa)	Ala Inf 10	SB2000	580	334,3	1,73
	Ala Inf 11	SB2000	580	567,3	1,02
	Ala Inf 14	SB2000	580	580,2	1,00
	Ala Sup 6	S355	355	204,9	1,73
	Ala Sup 7	S355	355	233,1	1,52
	Ala Sup 8	S355	355	205,2	1,73
	Alma 13	S355	355	292,6	1,21
	Alma 14	S355	355	238,2	1,49
	Alma 23	S355	355	278,4	1,28
	Placa Amarre Patas	S355	355	357,0	1,00
	Chapa Kingpin	S355	355	355,2	1,00
	Escudos	S500MC	500	500,1	1,00
	L Kingpin	S355	355	206,8	1,72
	Nervios Esc M	S355	355	289,0	1,23
	Nervios Esc Tras	S355	355	234,3	1,52
	Puente Trans	S500MC	500	333,1	1,50
	Ref Eje giro	S355	355	210,9	1,68
	Ref Ala Inferior	SB2000	580	353,2	1,64
	Eje Amarre Patas	S355	355	355,0	1,00
	Ref Alma Larguero	S355	355	301,8	1,18

Tabla 2. Valores de referencia de tensión de VM y CS

Las zonas con coeficiente de seguridad en rojo serán las que más habrá que tener en cuenta, ya que son las más susceptibles de provocar fallos en la estructura, al estar más cerca del límite de fluencia.

		SENTIDO POSITIVO	SENTIDO NEGATIVO
OPTIMIZACIÓN 7	Dirección longitudinal(mm)	12,33	-1,85
	Dirección transversal(mm)	13,56	-13,57
	Dirección vertical (mm)	0,00	-69,29

Tabla 3. Valores de referencia de desplazamientos

El desplazamiento negativo en la dirección vertical es el de mayor magnitud debido al gran peso que debe soportar la estructura, este desplazamiento se localiza en la zona central del bastidor del semirremolque.

El propósito de este proyecto será el de intentar disminuir la masa de la estructura procurando mantener estos valores en unos intervalos similares.

## PRIMEROS RESULTADOS Y POST-PROCESAMIENTO DE LOS MISMOS

Una vez que el programa OPTIMUS finalizó sus cálculos, el siguiente paso para el proceso de optimización era el de analizar todos los resultados de todos los experimentos que el programa había calculado.

Durante este proceso de cálculo surgieron numerosos problemas con el software que limitaron en cierta medida la exactitud de los resultados, ya que el diseño de experimentos estaba programado en un principio para realizar en torno a 1000 experimentos alrededor del punto nominal (todos los valores de espesor iniciales) que se había impuesto.

Por razones de compatibilidad de los programas informáticos y por otros relacionados con la antigüedad del software sólo se pudieron calcular en torno a los 250 experimentos y por lo tanto se decidió continuar con el proceso de optimización a partir del mejor de los experimentos que se observaron de todos los que habían sido calculados, el **experimento 135** (el cual se nombrará varias veces durante este informe). Si se desea se pueden consultar todos los experimentos de la optimización en el **Anexo 2**.

Se realizaron otros dos intentos para conseguir realizar los 1000 experimentos que en un principio se habían diseñado, pero tras dos nuevos errores del programa y al ver que el tiempo perdido en estos intentos retrasaba en demasía el proyecto (cada intento podía retrasar unos 15 días la finalización del proyecto) se llegó a la conclusión de seguir a partir del mejor de los experimentos.

La idea principal del cálculo de la solución óptima consistía en dar la mayor cantidad de datos, limitaciones, restricciones y singularidades posibles del modelo al programa OPTIMUS para que éste, directamente, llegase a una solución óptima, y a partir de ella corroborar los resultados y hacer pequeñas modificaciones si fuese necesario.

Pero al surgir todos estos problemas de compatibilidad se optó por seguir un camino diferente. A partir del experimento 135, que ya se ha nombrado, se comenzó un proceso de optimización paralelo que consistía en un sistema “prueba – error”.

El experimento 135 era, de todos los que habían sido calculados, el que mejor cumplía los requisitos de tensión impuestos en las zonas más problemáticas de la estructura siendo además uno de los que más había conseguido disminuir su masa.

A partir de este experimento se comenzó el método “prueba – error” anteriormente comentado. Desde este punto se utilizó el programa ABAQUS para observar minuciosamente las zonas más y menos solicitadas de toda la estructura y a partir de ahí, hacer los cambios que se consideren necesarios tanto para disminuir la masa de la estructura (aligerando las zonas menos solicitadas) como para asegurar la integridad de la misma (reforzar las zonas más complicadas).

Tras hacer estos cambios, se introducía el nuevo diseño otra vez en el programa OPTIMUS para poder observar si los cambios llevados a cabo habían sido satisfactorios o no para la consecución de los objetivos establecidos. Los cambios realizados (siempre referentes al espesor de los largueros) debían ser de poca magnitud para que se pudiese observar correctamente si eran positivos para el proceso de optimización.

Por otra parte, la razón por la que se introducían de nuevo los cambios en el programa OPTIMUS, a pesar de ser un programa de optimización por cálculos matemáticos, era porque en este programa ya estaban preestablecidos los criterios de viabilidad y se permitía observar directamente en tablas las tensiones en las zonas más críticas de la estructura y valorar si el nuevo diseño era o no correcto.

Si se observaba que los datos que daba el programa OPTIMUS para el nuevo diseño eran incorrectos (normalmente en algunas zonas, sobre todo al principio, los valores de tensión salían de los límites) se volvían a establecer los valores de espesor previos en las zonas que sobrepasaban los límites. Si los datos eran aceptables se proseguía a analizar minuciosamente el nuevo diseño en el programa ABAQUS y llevar a cabo el mismo proceso, análisis de las zonas más y menos solicitadas para aligerar o reforzar según fuese necesario.

Con este proceso se crearon **8 modificaciones** respecto del modelo original hasta llegar al diseño final en el que cualquier cambio perjudicaría tanto a la masa del bastidor, como a la fabricación del mismo.

En la imagen de abajo (*Figura 12*) se puede ver el proceso de optimización desde el diseño inicial que pasa por las sucesivas modificaciones hasta llegar a la solución óptima.



Figura 12. Proceso de optimización

## RESULTADOS Y ANÁLISIS

Tras las 8 modificaciones realizadas sobre el modelo inicial siguiendo el proceso de optimización que se ha explicado en el apartado anterior, en esta sección se mostrarán los resultados relevantes que se han ido obteniendo en cada una de estas modificaciones para que el lector pueda observar la tendencia de los cambios realizados y como repercuten en los criterios establecidos.

En los cambios en los espesores de cada tramo se puede ver que destacan 3 tipos diferentes de modificaciones:

1. Cambios debidos **a la necesidad de reforzar determinadas zonas**, como ocurre en el cambio de espesor del experimento 135 al revisado para subsanar los fallos.
2. Cambios **debidos a la necesidad de normalizar las medidas** de espesor de las chapas, ya que éstas se venden en unas medidas estándar, y por tanto los resultados debían regirse por ellas. Se observa en el cambio de espesores del experimento 135 revisado al normalizado, en el que sólo se usan chapas don múltiplos de 0.5.
3. Cambios realizados **para aligerar la masa de la estructura**, como sucede en los 5 experimentos siguientes al normalizado.

Seguidamente se expondrán las tablas con los cambios de espesor en los tramos del alma y alas de los largueros en cada uno de los experimentos revisados.

El experimento normalizado se basa en el experimento anterior, del cual se han redondeado los valores del espesor a valores enteros.

También cabe explicar que las sucesivas “Ms” que se escriben en el nombre de los experimentos quieren dar información del número de mejora que se está llevando a cabo. Además los colores utilizados para las celdas tienen diferentes significados según la comparación entre el modelo inicial y la solución final:

- **Verde** – El espesor de ese tramo en la solución final es **menor** que en la inicial.
- **Azul** – El espesor de ese tramo en la solución final es **mayor** que en la inicial.
- **Morado** – El espesor de ese tramo en la solución final es **igual** que en la inicial.

	OP7 TRAMOS	EXP 135	EXP 135 REV	EXP 135 NORM	EXP 135 M	EXP 135 M-M	EXP 135 M-M-M	EXP 135 M-M-M-M	EXP 135 M-M-M-M-M
ALMA 1	4	3,409	3,409	3	3	3	3	3	3
ALMA 2	4	3,566	3,566	4	4	4	3	3	3
ALMA 3	6	5,270	5,270	5	5	5	4	4	4
ALMA 4	6	5,875	5,875	6	6	5	5	5	5
ALMA 5	6	5,761	5,761	6	6	5	5	5	5
ALMA 6	6	5,496	5,496	5	5	5	5	5	5
ALMA 7	6	5,011	6,000	6	6	6	6	6	5
ALMA 8	6	6,791	6,791	7	7	6	6	6	5
ALMA 9	6	5,754	5,754	6	6	6	6	6	5
ALMA 10	6	5,461	5,461	5	5	5	5	5	5
ALMA 11	6	5,103	5,103	5	5	5	5	5	5
ALMA 12	6	5,250	5,250	5	5	5	5	5	5
ALMA 13	6	6,963	6,963	7	6,5	6,5	6,5	6,5	6,5
ALMA 14	6	5,969	5,969	6	5,5	5	5	5	5
ALMA 15	6	5,003	5,003	5	5	5	5	5	5
ALMA 16	6	6,948	6,948	7	7	5	5	5	5
ALMA 17	5	4,337	4,337	4	4	4	4	4	4
ALMA 18	5	4,147	4,147	4	4	4	4	4	4
ALMA 19	5	4,331	4,331	4	4	4	4	4	4
ALMA 20	5	4,407	4,407	4	4	4	4	4	4
ALMA 21	5	6,435	6,435	6	6	5	5	5	4
ALMA 22	5	5,290	5,290	5	5	5	5	5	4,5
ALMA 23	5	6,344	6,344	6	5,5	5,5	5	5	5

Tabla 4. Proceso Optimización espesor Alma

En esta tabla puede verse como se ha podido reducir el espesor de todos los tramos del alma excepto dos, incluso uno de ellos ha tenido que ser aumentando para poder disminuir los tramos adyacentes (esto se debe a que en la zona referente al tramo 13 del alma existe una de las mayores concentraciones de tensión que se verá más adelante).

Cabe destacar también que en el experimento revisado se aumento el espesor del tramo 7 para intentar reforzar una zona crítica adyacente, luego se observó que no era necesario y que aumentando el espesor del ala superior era suficiente para mantener la resistencia.

El resto de tramos sigue una evolución lineal en la que se ha intentando disminuir poco a poco su espesor observando los posibles defectos en ABAQUS.

	OP7 TRAMOS	EXP 135	EXP 135 REV	EXP 135 NORM	EXP 135 M	EXP 135 M-M	EXP 135 M-M-M	EXP 135 M-M-M-M	EXP 135 M-M-M-M-M
ALA-SUP 1	8	8,302	8,302	8	8	6	6	6	6
ALA-SUP 2	8	6,248	6,248	6	6	6	6	6	6
ALA-SUP 3	8	7,762	7,762	8	8	7	6	6	6
ALA-SUP 4	8	8,418	8,418	8	8	7	6	6	6
ALA-SUP 5	8	8,577	8,577	9	9	8	7,5	7,5	7
ALA-SUP 6	8	9,830	9,830	10	9	8	8	8	7,5
ALA-SUP 7	8	6,048	7,000	7	8	8	7,5	7,5	7,5
ALA-SUP 8	10	10,405	10,405	10	9	8	7,5	7,5	7,5
ALA-SUP 9	10	11,651	11,651	12	10	9	9	9	9
ALA-SUP 10	10	9,721	9,721	10	10	9	9	9	9
ALA-SUP 11	10	9,398	9,398	9	9	9	9	9	9
ALA-SUP 12	10	9,626	9,626	10	10	9	9	9	9
ALA-SUP 13	10	8,443	8,443	8	8	8	8	8	8
ALA-SUP 14	10	9,446	9,446	10	10	10	10	10	9
ALA-SUP 15	8	8,946	8,946	9	9	9	9	9	9
ALA-SUP 16	8	6,297	6,297	6	6	6	6	6	6
ALA-SUP 17	8	9,264	9,264	9	9	6	6	6	6
ALA-SUP 18	8	6,167	6,167	6	6	6	6	6	6
ALA-SUP 19	8	8,238	8,238	8	8	7	7	7	6
ALA-SUP 20	8	8,268	8,268	8	8	7	7	7	6
ALA-SUP 21	8	7,263	7,263	7	7	7	7	7	6
ALA-SUP 22	8	7,672	7,672	8	8	8	8	8	7
ALA-SUP 23	8	8,360	8,360	8	7	7	7	7	7

Tabla 5. Proceso Optimización espesor Ala Superior

En el Ala superior sólo es necesario aumentar el espesor del tramo 15 para mantener la misma resistencia disminuyendo considerablemente la masa del elemento. También se observa que respecto al primer experimento es necesario aumentar el espesor del tramo 7 relacionado con el mismo tramo del alma como se ha comentado antes. Se observa como ha sido necesario realizar varias variaciones de espesor en los tramos colindantes hasta llegar a una situación que cumpla todos los requisitos.

	OP7 TRAMOS	EXP 135	EXP 135 REV	EXP 135 NORM	EXP 135 M	EXP 135 M-M	EXP 135 M-M-M	EXP 135 M-M-M-M	EXP 135 M-M-M-M-M
ALA-INF 1	6	6,501	6,501	6	6	6	6	6	4
ALA-INF 2	6	6,352	6,352	6	6	6	6	6	4
ALA-INF 3	10	9,076	9,076	9	9	7	7	7	7
ALA-INF 4	10	9,293	9,293	9	9	7	7	7	7
ALA-INF 5	10	10,666	10,666	10	10	8	8	8	8
ALA-INF 6	10	8,429	8,429	8	8	8	8	8	8
ALA-INF 7	10	11,455	11,455	11	11	10	10	10	10
ALA-INF 8	10	10,979	10,979	11	11	10	10	10	10
ALA-INF 9	10	9,302	9,302	9	9	10	10	10	10
ALA-INF 10	10	10,929	10,929	11	11	11	10	10	10
ALA-INF 11	10	10,556	10,556	11	11	11	10	10,5	10,5
ALA-INF 12	10	8,942	8,942	9	9	9	9	9	9
ALA-INF 13	10	9,466	9,466	9	9	9	9	9	9
ALA-INF 14	10	10,684	10,684	11	11	11	10	10,5	10,5
ALA-INF 15	10	8,577	8,577	9	9	9	9	9	9
ALA-INF 16	10	8,867	8,867	9	9	9	9	9	9
ALA-INF 17	10	8,507	8,507	9	9	9	9	9	8
ALA-INF 18	10	10,148	10,148	10	10	9	9	9	8
ALA-INF 19	10	8,942	8,942	9	9	9	9	9	8
ALA-INF 20	10	11,066	11,066	11	11	9	9	9	8
ALA-INF 21	10	8,368	8,368	8	8	8	8	8	7
ALA-INF 22	8	7,952	7,952	8	8	8	8	7	6,5
ALA-INF 23	6	6,688	6,688	7	7	6	6	5	4,5

Tabla 6. Proceso Optimización espesor Ala Inferior

El ala inferior es el elemento más solicitado de los largueros y se observa en esta tabla al haber tenido que aumentar dos tramos de espesor y conservarlo en otros 4.

Esto se entiende también con el aspecto de que los tramos del 6 al 16 están fabricados en acero SB2000, el cual tiene más de un 60% más de resistencia que el acero del que están hechos el resto de tramos (S355) y que por tanto, desde un principio, se sabía que iban a tener que soportar tensiones mayores. Es por todo esto por lo que en varios de esos tramos no se ha podido reducir el espesor e incluso en algunos ha habido que aumentarlo para compensar la reducción de otros.

A pesar de todo se ha conseguido una reducción de espesor considerable tanto en las alas como en el alma, ya que se ha conseguido reducir el espesor del 87 % de los tramos, lo que implica un ahorro de peso más que aceptable como se podrá ver en apartados siguientes.

Como aspecto importante de diseño, se intentó que la distribución de espesores de la solución final en los tres elementos estuviese bien distribuida, es decir, que no hubiese saltos entre los espesores de las chapas colindantes, por eso se ha intentado que los aumentos y disminuciones fueran progresivos, para no tener que acoplar, por ejemplo, en tres tramos seguidos, una chapa de 4mm con otra de 5mm y otra de 6.5mm. Ha habido zonas en las que no se ha podido seguir este patrón como en los tramos en los 11-12-13 y 14 del ala inferior, pero se ha intentado mantener este criterio en la medida de lo posible.

Todas estas modificaciones y cambios en los espesores de los diferentes tramos en los que se han dividido los largueros son consecuencia principalmente del exceso o carencia de tensión en las zonas que se van a mostrar a continuación. Estas zonas coinciden con las que ya se mostraron en otros apartados de la memoria y que son a las que era conveniente prestar especial atención, ya que eran las que menor coeficiente de seguridad tenían en la anterior optimización (se han elegido todas aquellas zonas que tenían un coeficiente de 1.7 o menor).

	OPTIMIZACIÓN 8	MATERIAL	$\sigma$ (MPa)	OP 7 TRAMOS	EXP 135	EXP 135 REV	EXP 135 NORM	EXP 135 M	EXP 135 M-M	EXP 135 M-M-M	EXP 135 M-M-M-M	EXP 135 M-M-M-M-M
VM (MPa)	Ala Inf 10	SB2000	580	334,3	328,7	329,2	322,3	322,8	323,6	344,0	341,5	388,0
	Ala Inf 11	SB2000	580	567,3	549,5	550,1	536,1	536,6	537,5	578,1	575,1	575,9
	Ala Inf 14	SB2000	580	580,2	580,1	580,1	580,0	580,0	580,0	580,3	580,2	580,2
	Ala Sup 6	S355	355	204,9	262,8	233,2	236,1	212,6	208,8	217,7	217,5	218,8
	Ala Sup 7	S355	355	233,1	334,5	280,8	284,9	225,3	223,5	232,0	231,8	241,2
	Ala Sup 8	S355	355	205,2	249,1	220,7	218,4	195,7	197,2	204,1	203,9	213,7
	Ala 13	S355	355	292,6	271,7	270,4	271,4	286,8	293,5	294,3	294,4	295,9
	Alma 14	S355	355	238,2	212,9	211,7	208,7	222,9	243,0	251,3	245,7	247,1
	Alma 23	S355	355	278,4	251,1	251,1	257,6	272,3	273,6	284,0	286,3	287,2
	Placa Amarre Patas	S355	355	357,0	356,8	356,8	356,7	356,8	356,9	357,0	357,0	357,0
	Chapa Kingpin	S355	355	355,2	355,2	355,2	355,2	355,2	355,2	355,2	355,2	355,2
	Escudos	S500MC	500	500,1	500,1	500,1	500,1	500,1	500,1	500,1	500,1	500,1
	L Kingpin	S355	355	206,8	209,5	208,7	210,3	209,1	224,3	226,0	226,1	227,3
	Nervios Esc M	S355	355	289,0	288,6	288,6	289,2	290,0	287,8	289,6	288,9	289,0
	Nervios Esc Tras	S355	355	234,3	219,0	218,9	218,8	227,2	227,7	226,6	227,4	227,7
	Puente Trans	S500MC	500	333,1	332,1	331,3	333,9	332,3	334,4	336,3	336,4	337,7
	Ref Eje giro	S355	355	210,9	198,4	198,5	201,2	206,3	205,5	210,9	210,4	209,0
	Ref Ala Inferior	SB2000	580	353,2	373,4	373,6	374,1	374,1	373,4	370,1	371,1	370,6
	Eje Amarre Patas	S355	355	355,0	355,0	355,0	352,4	353,9	355,0	355,0	355,0	355,0
	Ref Alma Larguero	S355	355	301,8	294,9	293,2	291,1	291,5	295,6	308,3	302,4	304,3

Tabla 7. Variación de la tensión de Von Mises en las zonas críticas

Se observa como la mayoría de las zonas de tensión han aumentado, pero se encuentran dentro de los límites que se establecieron previamente en el apartado “diseño de la optimización”. Esto se debe a que la mayoría eran zonas que podían sufrir algo más de tensión en beneficio de la masa de la estructura, aun así el aumento es bastante escaso y por tanto se considera el resultado como viable.

Puede verse como hay zonas como el Ala inferior 10, Alma 14, Ala superior 6-8 y Refuerzo del alma han sufrido variaciones en ambos sentidos, aumentando y disminuyendo sus tensiones máximas conforme se iban llevando a cabo experimentos. Éstas han sido las zonas más difíciles de delimitar, ya que dependían de más tramos que el resto de las zonas.

Sin embargo hay otras zonas en las que se atisba un cambio constantes, ya sea hacia arriba o hacia abajo, en las cuales fue más sencillo alcanzar una solución óptima.

Para acabar con el criterio de resistencia se expondrán los valores de los coeficientes de seguridad al inicio y al final de la optimización para que el lector pueda compararlos y ver que la variación de ellos ha sido mínima, que, por otra parte, era lo que se buscaba desde un principio.

		MATERIAL	$\sigma$ (MPa)	OPT 7	CS OPT 7	EXP 135 M-M-M-M-M	CS OP8
VM (MPa)	Ala Inf 10	SB2000	580	334,3	1,73	388,0	1,49
	Ala Inf 11	SB2000	580	567,3	1,02	575,9	1,01
	Ala Inf 14	SB2000	580	580,2	1,00	580,2	1,00
	Ala Sup 6	S355	355	204,9	1,73	218,8	1,62
	Ala Sup 7	S355	355	233,1	1,52	241,2	1,47
	Ala Sup 8	S355	355	205,2	1,73	213,7	1,66
	Alma 13	S355	355	292,6	1,21	295,9	1,20
	Alma 14	S355	355	238,2	1,49	247,1	1,44
	Alma 23	S355	355	278,4	1,28	287,2	1,24
	Placa Amarre Patas	S355	355	357,0	1,00	357,0	1,00
	Chapa Kingpin	S355	355	355,2	1,00	355,2	1,00
	Escudos	S500MC	500	500,1	1,00	500,1	1,00
	L Kingpin	S355	355	206,8	1,72	227,3	1,56
	Nervios Esc M	S355	355	289,0	1,23	289,0	1,23
	Nervios Esc Tras	S355	355	234,3	1,52	227,7	1,56
	Puente Trans	S500MC	500	333,1	1,50	337,7	1,48
	Ref Eje giro	S355	355	210,9	1,68	209,0	1,70
	Ref Ala Inferior	SB2000	580	353,2	1,64	370,6	1,57
	Eje Amarre Patas	S355	355	355,0	1,00	355,0	1,00
	Ref Alma Larguero	S355	355	301,8	1,18	304,3	1,17

Tabla 8. Variación del coeficiente de seguridad

Se ve que la variación es prácticamente nula excepto en las zonas con coeficientes mayores, donde se permitirían cambios de mayor magnitud. Por otra parte es evidente que si se quiere minimizar la masa de una estructura es lógico que algunas de las cualidades resistivas del bastidor se vean afectadas, pero el propósito de este proyecto es que este cambio sea el menor posible. Se puede ver una comparación con imágenes más concretas de las zonas más afectadas en el **Anexo 3** de la memoria.

Por último queda mostrar los resultados de rigidez que ha dado el nuevo modelo. En la siguiente tabla se observará la comparación entre los desplazamientos máximos en las tres direcciones de la estructura.

		SENTIDO POSITIVO	SENTIDO NEGATIVO
OPTIMIZACIÓN 7	U1 longitudinal (mm)	12,33	-1,85
	U2 transversal (mm)	13,56	-13,57
	U3 vertical(mm)	0,00	-69,29
OPTIMIZACIÓN 8	U1 longitudinal (mm)	12,62	-1,99
	U2 transversal (mm)	13,60	-13,60
	U3 vertical (mm)	0,00	-70,29

Tabla 9. Desplazamientos máximos

Como se ve, la diferencia entre los valores máximos es prácticamente mínima, por lo tanto queda demostrado que también se han cumplido los criterios acerca de la rigidez de la estructura. Ahora se especificará con más detalle y con imágenes explícitas las zonas donde se crean estos desplazamientos máximos.



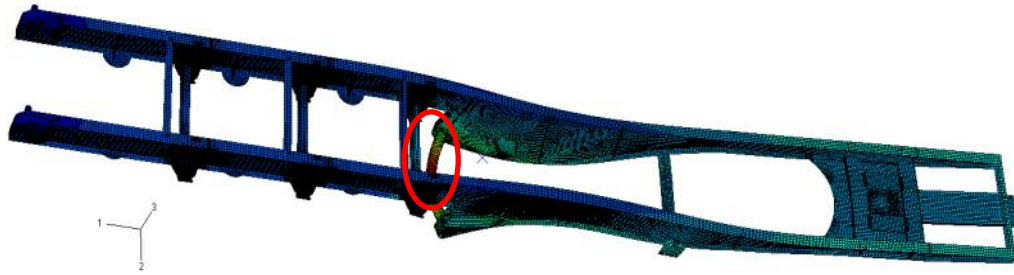


Figura 13. Desplazamiento U1 longitudinal

Como se ve en la figura, el desplazamiento máximo (el color rojo en este caso) se encuentra en el eje inferior que une los dos largueros, es más, toda la zona de alrededor de dicho eje es la que mayores desplazamientos en esta dirección sufre. Esto se debe a que los actuadores que elevan la carga están situados en una zona muy cercana, y por lo tanto, cargan la parte central de los largueros.

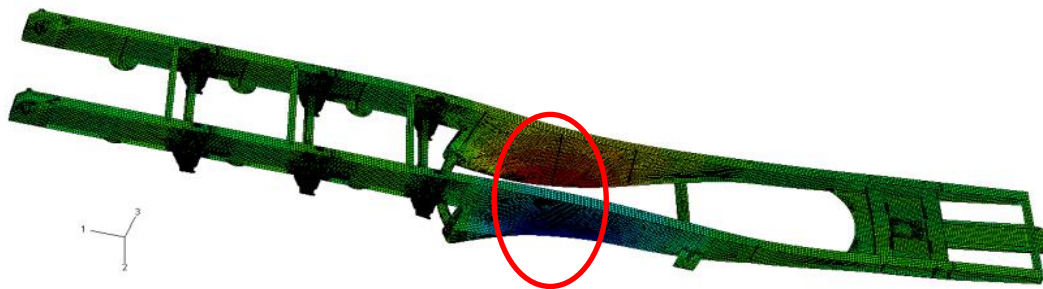


Figura 14. Desplazamiento U2 transversal

En el caso de la dirección transversal, los desplazamientos son máximos e iguales en los dos sentidos en la zona central del alma (colores rojo y azul). Se debe, al igual que en la dirección 1, a que la zona central del alma sufre grandes esfuerzos de compresión debido al trabajo que ejercen los actuadores situados próximos a esta zona.

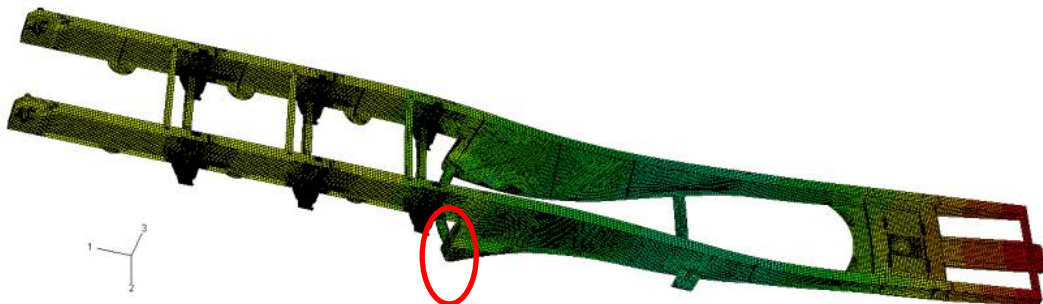


Figura 15. Desplazamiento U3 Vertical

Ahora hay que fijarse en los colores más oscuros, el verde en particular, situado en la zona más baja de los largueros que es la que soporta gran parte del peso al intentar elevarse la carga por medio de los actuadores y que es la zona más desplazada hacia abajo. No existen, obviamente, desplazamientos en sentido vertical positivo, ya que la carga es debida a la gravedad.

Para terminar con la presentación y el análisis de los resultados sólo queda exponer los datos acerca de lo que se considera el objetivo principal de este proyecto, disminuir la masa de la estructura. En la siguiente tabla se encuentran todos los valores de masa de la estructura, de los largueros, de los elementos de los largueros por separado y del ahorro de masa en cada uno de los experimentos realizados, para que se pueda ver con claridad la progresión referente a este valor.

	OP7 TRAMOS	EXP 135	EXP 135 REV	EXP 135 NORM	EXP 135 M	EXP 135 M-M	EXP 135 M-M-M	EXP 135 M-M-M-M	EXP 135 M-M-M-M-M
MASA (kg)	33365,92	33350,34	33353,46	33339,14	33327,99	33285,42	33273,78	33273,41	33243,88
MASA BASTIDOR (kg)	1303,21	1287,63	1290,75	1276,43	1265,28	1222,71	1211,07	1210,7	1181,17
MASA LARGUEROS (kg)	837,49	823,99	827,11	813,73	802,58	758,82	748,36	747,99	715,75
PESO ALMA (kg)	432,3	422,03	424,28	413,67	406,96	388,89	384,46	384,46	369,9
PESO ALA SUP (kg)	190,71	188,06	188,93	187,47	183,03	168,91	165,62	165,62	159,56
PESO ALA INF (kg)	214,48	213,9	213,9	212,59	212,59	201,02	198,28	197,91	186,29
AHORRO ALMA (kg)	-	10,27	8,02	18,63	25,34	43,41	47,84	47,84	62,34
AHORRO ALA SUP (kg)	-	3,04	2,17	3,63	8,07	22,19	25,48	25,48	31,14
AHORRO ALA INF (kg)	-	3,2	3,2	4,51	4,51	16,08	18,82	19,19	28,55
AHORRO TOTAL (kg)	-	16,51	13,39	26,77	37,92	81,68	92,14	92,51	122,03
AHORRO ALMA (%)	-	2,38	1,86	4,31	5,86	10,04	11,07	11,07	14,43
AHORRO ALA SUP (%)	-	1,39	0,93	1,70	4,03	11,43	13,16	13,16	16,33
AHORRO ALA INF (%)	-	0,27	0,27	0,88	0,88	6,28	7,55	7,73	13,14
AHORRO TOTAL (%)	-	1,97	1,60	3,20	4,53	9,75	11,00	11,05	14,57

Tabla 10. Valores de masa y ahorro en los experimentos

Como era evidente, en cada experimento se ha conseguido rebajar la masa de la estructura cada vez más, hasta llegar a un ahorro total de la masa de los largueros de 122.03 kg, lo que supone más de casi un 15% respecto al peso de los largueros originales. Como anécdota puede verse que en el paso de la tercera mejora a la cuarta el ahorro de peso en la estructura es prácticamente nulo, debido a que este experimento se hizo sólo para conseguir disminuir las tensiones y subsanar fallos, sin prestar atención a la reducción de masa.

Cabe explicar también que el paso de la masa total de la estructura a la masa únicamente del bastidor se ha hecho restándole a la primera el valor de la carga mayorada (31200 kg) y de los elementos que no formaban parte del bastidor, como pueden ser los actuadores, la caja, los muelles, etc. Lo mismo se ha hecho para sacar el valor de la masa de los largueros, se le ha restado al valor del bastidor todos los elementos que no formasen parte del alma o de las alas de los mismos. Ha habido que hacerlo de este modo porque el programa PATRAN, al diseñar el modelo, da el valor de la masa de todo el conjunto, incluidas las cargas que le se le aplican a la estructura.

## CAMBIO DE MATERIALES

En este apartado se expondrá un breve análisis acerca de la posibilidad o no de reducir el nivel de la resistencia del acero empleado para la fabricación de los tramos en los que se han dividido los tres elementos de los largueros.

Si se observa minuciosamente los esfuerzos que sufre la estructura en su solución final (la optimización realizada en este proyecto) con el programa ABAQUS, se puede llegar a la conclusión de que existen zonas de los largueros que están muy poco solicitadas, y que por tanto puede emplearse un acero que resulte más económico para el fabricante sin poner en peligro la integridad de la estructura.

Como criterio principal para decidir si la reducción de la resistencia del acero empleado es o no viable se empleará el siguiente:

- **Ninguno de los tramos podrá tener un coeficiente de seguridad menor de 2** en ninguno de los casos, en cuanto a tensiones máximas de Von Mises que sufran, excepto las que correspondan a las denominadas zonas críticas de anteriores apartados, que poseen coeficientes de seguridad menores.

Para poder decidir sobre este criterio se analizaron por separado cada uno de los tramos en los que se dividieron los largueros del bastidor, y se obtuvieron los valores máximos de tensión en cada uno de ellos. Dichos valores pueden verse en el **Anexo 4** de esta memoria, donde se encuentran las tablas que resumen las decisiones tomadas para el cambio de los materiales y los coeficientes de seguridad (CS) de todos los tramos antes y después del cambio de materiales.

Se utilizarán para este estudio, 4 niveles diferentes de acero, los cuales se exponen ahora ordenados de menor a mayor resistencia:

- Acero S-275             $\sigma = 275 \text{ MPa}$
- Acero S-355             $\sigma = 355 \text{ MPa}$
- Acero S-500MC         $\sigma = 500 \text{ MPa}$
- Acero SB-2000         $\sigma = 580 \text{ MPa}$

En todos los cambios de material realizados sólo se bajará un nivel de resistencia ya que las modificaciones realizadas no pueden ni deben ser demasiado importantes. Por otra parte, los resultados de rigidez obtenidos con este cambio de materiales son prácticamente nulos, de hecho en el programa ABAQUS que es donde se observan estos resultados el valor de desplazamiento de la estructura en todas las direcciones es exactamente el mismo antes y después de la variación de materiales, y es por eso por lo que no se compararán aquí los resultados.

En la siguiente tabla se pueden ver los resultados del análisis del cambio de materiales.

	Acero inicial	Acero final		Acero inicial	Acero final		Acero inicial	Acero final
Alma 1	S355	S275	Ala Superior 1	S355	S275	Ala Inferior 1	S355	S275
Alma 2	S355	S275	Ala Superior 2	S355	S275	Ala Inferior 2	S355	S275
Alma 3	S355	S275	Ala Superior 3	S355	S275	Ala Inferior 3	S355	S275
Alma 4	S355	S275	Ala Superior 4	S355	S275	Ala Inferior 4	S355	S275
Alma 5	S355	S275	Ala Superior 5	S355	S355	Ala Inferior 5	S355	S355
Alma 6	S355	S355	Ala Superior 6	S355	S355	Ala Inferior 6	SB2000	S500MC
Alma 7	S355	S355	Ala Superior 7	S355	S355	Ala Inferior 7	SB2000	SB2000
Alma 8	S355	S355	Ala Superior 8	S355	S355	Ala Inferior 8	SB2000	SB2000
Alma 9	S355	S355	Ala Superior 9	S355	S355	Ala Inferior 9	SB2000	SB2000
Alma 10	S355	S355	Ala Superior 10	S355	S355	Ala Inferior 10	SB2000	SB2000
Alma 11	S355	S275	Ala Superior 11	S355	S355	Ala Inferior 11	SB2000	SB2000
Alma 12	S355	S275	Ala Superior 12	S355	S355	Ala Inferior 12	SB2000	SB2000
Alma 13	S355	S355	Ala Superior 13	S355	S275	Ala Inferior 13	SB2000	SB2000
Alma 14	S355	S355	Ala Superior 14	S355	S275	Ala Inferior 14	SB2000	SB2000
Alma 15	S355	S355	Ala Superior 15	S355	S275	Ala Inferior 15	SB2000	SB2000
Alma 16	S355	S355	Ala Superior 16	S355	S275	Ala Inferior 16	SB2000	SB2000
Alma 17	S355	S275	Ala Superior 17	S355	S275	Ala Inferior 17	S355	S355
Alma 18	S355	S275	Ala Superior 18	S355	S275	Ala Inferior 18	S355	S275
Alma 19	S355	S275	Ala Superior 19	S355	S275	Ala Inferior 19	S355	S275
Alma 20	S355	S275	Ala Superior 20	S355	S275	Ala Inferior 20	S355	S275
Alma 21	S355	S355	Ala Superior 21	S355	S275	Ala Inferior 21	S355	S355
Alma 22	S355	S355	Ala Superior 22	S355	S275	Ala Inferior 22	S355	S355
Alma 23	S355	S355	Ala Superior 23	S355	S275	Ala Inferior 23	S355	S275

Tabla 11. Cambio de materiales

Como aspectos importantes se observa como en el ala inferior de la estructura sólo se ha podido rebajar el grado de resistencia de uno de los tramos con el acero más resistente (SB2000) y esto es debido que toda esta zona es la más solicitada de toda la estructura del bastidor.

Otra cosa que puede llamar la atención son los saltos de material en algunos tramos, pero como el cambio de resistencia de un acero a otro no es demasiado grande se pueden realizar estos cambios sin ningún tipo de problema.

Se observa también como las zonas inicial y final de los largueros son en las que más fácil es disminuir la resistencia del acero, ya que la mayoría del esfuerzo de la estructura se concentra en la zona central del mismo, y de hecho tramos como 7-8-9-10-13 no cambian de material en ninguno de sus elementos.

Una vez realizado este análisis para disminuir la resistencia del acero en las zonas menos afectadas se va a proceder a hacer un estudio contrario, es decir, intentar reforzar las zonas más críticas de la estructura (las que son analizadas durante toda la memoria) con aceros de alta resistencia como el **S700MC** ( $\sigma = 700$  MPa) y **S960MC** ( $\sigma = 960$  Mpa) procurando que el coeficiente de seguridad de las mismas sea de al menos 1.5.

Tras aumentar la resistencia del acero a 700 MPa en los siguientes elementos:

- Ala inferior 11
- Ala inferior 14
- Alma 13
- Alma 14
- Alma 23
- Placa amarre patas
- Chapa Kingpin
- Escudos
- Nervios Escudos M
- Eje amarre patas
- Refuerzo alma larguero

En el resto de zonas se considera que el CS ya es lo suficientemente próximo a 1.5 como para utilizar un acero de más calidad y más caro.

Los resultados de los coeficientes de seguridad que se obtienen aplicando a todas estas zonas el acero S700MC son los siguientes:

		Con S700MC	CS
<b>VM (MPa)</b>	<b>Ala Inf 10</b>	381,3	1,52
	<b>Ala Inf 11</b>	<b>571,0</b>	<b>1,23</b>
	<b>Ala Inf 14</b>	<b>645,7</b>	<b>1,08</b>
	<b>Ala Sup 6</b>	218,8	1,62
	<b>Ala Sup 7</b>	241,2	1,47
	<b>Ala Sup 8</b>	213,7	1,66
	<b>Alma 13</b>	<b>295,9</b>	<b>2,37</b>
	<b>Alma 14</b>	<b>246,9</b>	<b>2,84</b>
	<b>Alma 23</b>	<b>287,2</b>	<b>2,44</b>
	<b>Placa Amarre Patas</b>	<b>652,5</b>	<b>1,07</b>
	<b>Chapa Kingpin</b>	<b>401,9</b>	<b>1,74</b>
	<b>Escudos</b>	<b>534,8</b>	<b>1,31</b>
	<b>L Kingpin</b>	227,3	1,56
	<b>Nervios Esc M</b>	<b>289,0</b>	<b>2,42</b>
	<b>Nervios Esc Tras</b>	227,7	1,56
	<b>Puente Trans</b>	337,7	1,48
	<b>Ref Eje giro</b>	209,0	1,70
	<b>Ref Ala Inferior</b>	370,6	1,57
	<b>Eje Amarre Patas</b>	<b>394,1</b>	<b>1,78</b>
	<b>Ref Alma Larguero</b>	<b>304,3</b>	<b>2,30</b>

Tabla 12. Coeficientes de seguridad de las zonas críticas tras el cambio de material

Se ha decidido incluir también el resto de las zonas críticas en la tabla para que se pueda observar que no sufren variación alguna a pesar del cambio de acero de las que tienen coeficiente de seguridad menor.

Los colores de las celdas de la tabla indican diferentes caminos a seguir según su CS:

- **Morado** – se mantendrá el acero **S700MC**
- **Verde** – se bajará a acero **S500MC**
- **Azul** – se subirá a acero **S960MC**

Debido a que algunas zonas todavía no alcanzan un coeficiente de seguridad excesivamente cercano a 1.5, y que otras tienen uno demasiado alto, se va a intentar afinar un poco más a un CS de 1.5 aplicando a estas zonas acero S960MC y S500MC respectivamente. Los resultados que se obtienen tras este último cambio son:

		Con S500MC, S700MC y S960MC	CS
<b>VM (MPa)</b>	<b>Ala Inf 10</b>	381,3	1,52
	<b>Ala Inf 11</b>	571,0	1,68
	<b>Ala Inf 14</b>	645,8	1,49
	<b>Ala Sup 6</b>	218,8	1,62
	<b>Ala Sup 7</b>	241,2	1,47
	<b>Ala Sup 8</b>	213,7	1,66
	<b>Alma 13</b>	295,9	1,69
	<b>Alma 14</b>	246,9	2,03
	<b>Alma 23</b>	287,2	1,74
	<b>Placa Amarre Patas</b>	652,5	1,47
	<b>Chapa Kingpin</b>	401,9	1,74
	<b>Escudos</b>	534,8	1,80
	<b>L Kingpin</b>	227,3	1,56
	<b>Nervios Esc M</b>	289,0	1,73
	<b>Nervios Esc Tras</b>	227,7	1,56
	<b>Puente Trans</b>	337,7	1,48
	<b>Ref Eje giro</b>	209,0	1,70
	<b>Ref Ala Inferior</b>	370,6	1,57
	<b>Eje Amarre Patas</b>	394,1	1,78
	<b>Ref Alma Larguero</b>	304,3	1,64

Tabla 13. Coeficientes de seguridad de las zonas más críticas con el último cambio de acero

Ahora sí se ha conseguido que el coeficiente de seguridad de prácticamente todas las zonas sea lo más cercano posible a 1.5.

Si se desea puede verse en la parte final del **Anexo 4** una comparación gráfica de la tensión antes y después del uso de aceros de alta resistencia en las zonas en las que se ha hecho.

Tras todos estos cambios de materiales en varias zonas de la estructura, la distribución de aceros por todo el bastidor queda de la siguiente manera:

	Acero inicial	Acero final		Acero inicial	Acero final		Acero inicial	Acero final
Alma 1	S355	S275	Ala Sup 1	S355	S275	Ala Inf 1	S355	S275
Alma 2	S355	S275	Ala Sup 2	S355	S275	Ala Inf 2	S355	S275
Alma 3	S355	S275	Ala Sup 3	S355	S275	Ala Inf 3	S355	S275
Alma 4	S355	S275	Ala Sup 4	S355	S275	Ala Inf 4	S355	S275
Alma 5	S355	S275	Ala Sup 5	S355	S355	Ala Inf 5	S355	S355
Alma 6	S355	S355	Ala Sup 6	S355	S355	Ala Inf 6	S82000	S500MC
Alma 7	S355	S355	Ala Sup 7	S355	S355	Ala Inf 7	S82000	S82000
Alma 8	S355	S355	Ala Sup 8	S355	S355	Ala Inf 8	S82000	S82000
Alma 9	S355	S355	Ala Sup 9	S355	S355	Ala Inf 9	S82000	S82000
Alma 10	S355	S355	Ala Sup 10	S355	S355	Ala Inf 10	S82000	S82000
Alma 11	S355	S275	Ala Sup 11	S355	S355	Ala Inf 11	S82000	S960MC
Alma 12	S355	S275	Ala Sup 12	S355	S355	Ala Inf 12	S82000	S82000
Alma 13	S355	S500MC	Ala Sup 13	S355	S275	Ala Inf 13	S82000	S82000
Alma 14	S355	S500MC	Ala Sup 14	S355	S275	Ala Inf 14	S82000	S960MC
Alma 15	S355	S355	Ala Sup 15	S355	S275	Ala Inf 15	S82000	S82000
Alma 16	S355	S355	Ala Sup 16	S355	S275	Ala Inf 16	S82000	S82000
Alma 17	S355	S275	Ala Sup 17	S355	S275	Ala Inf 17	S355	S355
Alma 18	S355	S275	Ala Sup 18	S355	S275	Ala Inf 18	S355	S275
Alma 19	S355	S275	Ala Sup 19	S355	S275	Ala Inf 19	S355	S275
Alma 20	S355	S275	Ala Sup 20	S355	S275	Ala Inf 20	S355	S275
Alma 21	S355	S355	Ala Sup 21	S355	S275	Ala Inf 21	S355	S355
Alma 22	S355	S355	Ala Sup 22	S355	S275	Ala Inf 22	S355	S355
Alma 23	S355	S500MC	Ala Sup 23	S355	S275	Ala Inf 23	S355	S275

Tabla 14. Cambio materiales en los largueros

	Acero inicial	Acero final
Placa Amarre Patas	S355	S960MC
Chapa Kingpin	S355	S700MC
Escudos	S500MC	S960MC
L Kingpin	S355	S355
Nervios Esc M	S355	S500MC
Nervios Esc Tras	S355	S355
Puente Trans	S355	S355
Ref Eje giro	S355	S355
Ref Ala Inferior	S82000	S82000
Eje Amarre Patas	S355	S700MC
Ref Alma Larguero	S355	S500MC

Tabla 15. Cambio de materiales en el resto de zonas críticas

## AHORRO EN LOS COSTES

Todos los cambios realizados en esta estructura durante la elaboración de este proyecto, ya sean cambios de espesor de los tramos en los que se han dividido los largueros o cambios de material de los mismos van encaminados hacia un mismo fin, disminuir los costes.

En este apartado se mostrará como todos estos cambios han conseguido mejorar no sólo aspectos como el peso de la estructura, sino también otros como el coste de fabricación, el coste de los materiales, el consumo de combustible...

Los precios que se tendrán en cuenta para la compra de acero (los precios que se estipulan son los relacionados con grandes compras de acero, es decir, compra de grandes toneladas) para el coste del combustible (gasoil en este caso por ser utilizado el semirremolque por camiones) y para el consumo medio de un camión típico a la hora de realizar el transporte serán los siguientes:

- Acero S-275 = 0.6 €/kg
- Acero S-355 = 0.65 €/kg
- Acero S-500MC = 0.7 €/kg
- Acero SB-2000 = 0.75 €/kg
- Acero S-700MC = 0.8 €/kg
- Acero S-960MC = 0.9 €/kg
  
- Gasoil = 1.36 €/litro
- Consumo medio = 32.3 litros/100km

Para obtener todos estos valores de consumos y precios se ha buscado por foros y páginas de fabricantes de camiones y en la página web de la empresa SSAB, que se dedica a la producción y venta de aceros.

También se debe tener en cuenta que para calcular el ahorro de combustible se ha utilizado la aproximación corroborada en varios sitios webs acerca de transporte de mercancías terrestre de que un **ahorro de 100 kg** en la carga de un camión con este consumo medio, supone un **5% menos de consumo de combustible**.

Por lo tanto el ahorro en costes conseguido con esta optimización del proyecto puede observarse en la *tabla 16*. Se ha separado el modelo optimizado con el análisis de material del que simplemente se optimiza para reducir el peso de la estructura para poder diferenciar el efecto de la reducción de la resistencia del acero en el coste.

	OP7 TRAMOS	OPT 8	OPT 8 CAMBIO MATERIALES	OPT 8 ACEROS ALTA RESISTENCIA
AHORRO ACERO ALMA (€)	-	40,563	47,920	44,007
AHORRO ACERO ALA SUP (€)	-	20,246	25,152	25,152
AHORRO ACERO ALA INF (€)	-	18,742	21,502	16,835
AHORRO TOTAL ACERO (€)	-	79,550	94,574	57,854
AHORRO COMBUSTIBLE (€/100 km)	-	2,680	2,680	2,680

Tabla 16. Ahorro de costes



Se observa que se consigue un ahorro de casi 100 € con la optimización y el cambio de materiales, siendo el efecto de esta reducción del nivel del acero de unos 15€ (se debe entender que estos valores están supeditados al precio de la compra del acero en grandes tonelajes).

Por el contrario con la utilización de aceros de alta resistencia para algunas zonas el ahorro disminuye casi en 40 €, siendo aún así menor que el coste de la estructura original. En la celda del ahorro total de la optimización con aceros de alta resistencia se ha restado además el sobre coste de los elementos a los que se les aplica el acero de alta resistencia pero que no pertenecen a los largueros como los escudos, la chapa kingpin y demás.

En cuanto al consumo de combustible el ahorro puede parecer escaso, pero los transportistas realizan una enorme cantidad de kilómetros a lo largo de todo el año, y cualquier reducción es sus costes se puede considerar como una gran ventaja en cuanto a sus ingresos.

Si se quiere observar más detenidamente los cálculos realizados para llegar a estas conclusiones se puede ojear el **Anexo 5** de esta memoria, donde aparecen todos los cálculos perfectamente explicados.

## CONCLUSIONES

Las conclusiones finales de este proyecto se pueden resumir en los siguientes términos:

- Se ha conseguido disminuir la masa de los largueros de la estructura en casi un 15%.
- Se han mantenido los valores de resistencia y rigidez iniciales.
- Se ha intentado que los cambios en los espesores sean lineales para facilitar la fabricación.
- Se ha conseguido un ahorro significativo tanto en materiales como en consumo de combustible.
- Con el cambio de materiales se ha conseguido un ahorro en costes todavía mayor.

Como otras reseñas importantes:

- Quizás podría hacerse una continuación de este proyecto usando aceros de alta resistencia para toda la estructura y programas de software de optimización más modernos que puedan vincularse con archivos de ABAQUS más recientes, así se conseguiría una mejor definición.
- La realización de este proyecto ha permitido conocer con bastante profundidad el uso de herramientas informáticas de elementos finitos y optimización que pueden ser útiles en el futuro.
- Resaltar la gran dificultad que ha existido en este proyecto a la hora de vincular los programas informáticos a utilizar debido a la antigüedad de algunos de ellos.
- La elaboración de un proyecto que proviene de una petición real de una empresa real permite conocer mejor como funcionan los métodos de trabajos de los ingenieros en este campo.
- El tiempo empleado para la realización de este proyecto ha sido de aproximadamente 5 meses, dos de los cuales fueron necesarios para aprender a utilizar el software y para poder vincular unos a otros.
- Como opinión personal se considera que se ha conseguido un resultado más que aceptable para este proyecto, partiendo de la idea de que anteriores optimizaciones habían conseguido disminuir el peso de la estructura en 20-30 kg (claro está que en esta optimización disminuir la masa era el objetivo principal, cosa que no ocurre en varias de las anteriores optimizaciones).

## BIBLIOGRAFÍA

- Guías y manuales de uso de:
  - PATRAN: <http://simcompanion.mscsoftware.com>
  - ABAQUS: <http://abaqus.ethz.ch:2080/v6.5/>
  - OPTIMUS: Getting started with OPTIMUS, “NOESIS”
- Optimizaciones previas del modelo (presentaciones de PPT proporcionadas por los directores del proyecto).
- Imágenes de semirremolques semejantes: <http://www.lecinena.es/>
- Valores de precio de combustible y consumo de camiones de transporte:
  - <http://www3.scania.com/es/New-V8-truck-range/Ventajas-V8/>
  - <http://www.volvotrucks.com/trucks/spain-market/es>
  - [http://www.dunlop.eu/dunlop\\_eses/what\\_sets\\_dunlop\\_apart/eu-tire-label-explained/truck/fuel-efficiency/index.jsp](http://www.dunlop.eu/dunlop_eses/what_sets_dunlop_apart/eu-tire-label-explained/truck/fuel-efficiency/index.jsp)
  - [http://www.goodyear.eu/es\\_es/tire-advice/safe-driving/driving-tips/fuel-saving-tips.jsp](http://www.goodyear.eu/es_es/tire-advice/safe-driving/driving-tips/fuel-saving-tips.jsp)
- Precio aceros: <http://www.ssab.com>